هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

# بررسی و مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی ریسک مورد استفاده جهت عملیات توپکرانی هوشمند در خطوط لوله انتقال نفت و گاز با تاکید بر روش Bow Tie

**محمد مهدی سالمی[۱]، لیلا ابراهیمی قوام آبادی[۲]**

**۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، mm.salemi@yahoo.com**

**۲- استادیار گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، leilaebrahimy@yahoo.com**

**چکیده**

با توجه به جایگاه و نقش صنایع فرآیندی از جمله صنعت نفت و گاز در اقتصاد هر کشور و از طرفی بالا بودن خطرات و ریسک‌های موجود در این صنایع، لزوم شناسایی، کنترل خطرات و آنالیز ریسک در صنایع فرآیندی بسیار حائز اهمیت است. هدف از این مطالعه، بررسی و مقایسه روش های مختلف ارزیابی ریسک[۱]مورد استفاده جهت عملیات توپکرانی هوشمند[۲]در خطوط لوله نفت و گاز با تاکید بر روش Bow Tie می باشد. روش های ارزیابی ریسک مختلفی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت با توجه به نتایج این بررسی و مقایسه نتایج تحقیقات پیشین با یکدیگر مشاهده شد که روش Bow Tie روشی کارآمد برای ارزیابی ریسک عملیات توپکرانی هوشمند در خطوط لوله انتقال نفت و گاز می باشد که نسبت به سایر روش های ارزیابی ریسک دارای مزیت های بیشتری بوده و با ترکیب آنالیز درخت خطا[۳]و آنالیز درخت رویداد[۴] انجام یک ارزیابی ریسک جامع از عملیات توپکرانی هوشمند در خطوط لوله انتقال نفت و گاز را محقق می سازد.

**واژه‌های کلیدی:** ارزیابی ریسک، توپکرانی هوشمند، خطوط لوله انتقال نفت و گاز، روش Bow Tie

## مقدمه

چگونگی بهره‌برداری از خطوط لوله و محافظت از آن بستگی بسیاری به عملیات توپکرانی و کارآیی پیگ‌های مورد استفاده دارد. در گذشته، پیگ‌ها تنها برای پاک‌سازی لوله از موم یا ضایعات و در نتیجه تسریع جریان سیال انتقالی در خط لوله مورد استفاده قرار می‌گرفت. امروزه، سیستم توپکرانی در چرخه‌ی کامل حفظ خطوط لوله یعنی در مراحل ساخت، بهره برداری، بازرسی، حفظ و نگهداری، تعمیر، مرمت و نوسازی و در مدت تعطیلی خط لوله یک ضرورت است [۱].

به منظور افزایش راندمان خط لوله، خطوط لوله به صورت دوره‌ای توپکرانی می‌شوند. این عملیات شامل ارسال و دریافت پیگ هوشمند می‌باشد که با عبور از داخل لوله باعث پاکسازی ناخالصی‌ها و رسوبات می‌شود. پیگ‌های مخصوص دیگری نیز به منظور شناسایی میزان خوردگی داخل لوله، تغیرات هندسی و ... بسته به نیاز استفاده می‌شود. خطرات بالقوه بسیاری در این عملیات موجود است که در صورت عدم تشخیص و کنترل، منجر به بروز حوادث جبران‌ناپذیری خواهد شد [۲].

---

۱ risk assessment
۲ intelligent pigging
۳ FTA: fault tree analysis
۴ ETA: event tree analysis

## بیان مساله

خطوط انتقالی که در جابجایی نفت و گاز قرار می‌گیرند، با وجود پالایش انجام شده بر آن، گاهی بر اثر عواملی، آلوده به گازهای سولفید هیدروژن، بخار آب و ... شده و شرایطی اسیدی و خورنده از خود بر جای می‌گذارند که پس از چندی، بهره‌برداری از خط انتقال را نا ایمن و بعضاً غیرممکن می‌سازند. رسوبات ناخواسته ناشی از مواد زائد در درون لوله، گاهی محفظه درونی لوله را به قدری تنگ می‌کند که برای انتقال مقدار حجم فرآورده مورد نیاز، انرژی بیشتری به منظور پمپاژ ناشی از کاهش راندمان، طلب می‌شود. کاهش راندمان از دو فاکتور افزایش زبری سطح و کاهش قطر داخلی لوله ناشی می‌شود. توپکرانی منظم باعث می‌شود که خط لوله خالی از مایعات بوده، از افت فشار کلی جلوگیری کرده و از این رو راندمان جریان را افزایش می‌دهد. از این گذشته پیگ در نشان دادن شرایط فیزیکی خط لوله نقش مهمی دارد. بنابراین هدف، اتخاذ روشی است که این معضلات گوناگون را کاهش داده و علاوه بر افزایش راندمان، ایمنی جامعه همجوار را نیز تضمین کند [۳].

عملیات ارزیابی خطوط لوله مستلزم داشتن اطمینان کافی از وضعیت هندسی و ابعاد داخل آن است. چراکه در حین عملیات، تورفتگی یا دوپهن شدن لوله و یا خرابی‌های دیگر به طور طبیعی ممکن است باعث گیر کردن و یا حتی گم شدن پیگ در لوله شود که این امر در صنعت نفت و گاز باعث قطع جریان در لوله شده و کل فرآیند انتقال را مختل می‌کند. از این رو نیاز به استفاده از ابزار قدرتمندی که بتواند قبل از هرگونه حادثه، بهره بردار را از شرایط درونی این خطوط آگاه سازد، امری اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. این ضرورت با استفاده از روش‌های هوشمند کنترل خطوط امکان‌پذیر است. امروزه با پیشرفت دانش در زمینه‌هایی همچون ریز پردازنده‌ها، ذخیره‌سازی داده‌ها، ابزار مافوق صوت، پلیمر و رایانه، روش نوینی در بازرسی خطوط لوله بوجود آمده است. این روش اصطلاحاً به توپکرانی هوشمند موسوم است [۳].

به منظور افزایش راندمان خط لوله، خطوط لوله انتقال گاز به صورت دوره‌ای مورد توپکرانی قرار می‌گیرند. این عملیات شامل دو عملیات مستقل ارسال و دریافت پیگ هوشمند می‌باشد که این پیگ با عبور از داخل لوله باعث پاکسازی میزان ناخالصی‌ها و رسوبات می‌شود. همچنین پیگ‌های مخصوص دیگری به منظور شناسایی میزان خوردگی داخل لوله، تغیرات هندسی خط لوله و ... در این عملیات بسته به نیاز استفاده می‌شود. خطرات بالقوه بسیاری در این عملیات موجود است که در صورت عدم تشخیص و کنترل، منجر به بروز حوادث جبران‌ناپذیری خواهد شد [۲].

تکنیک تحلیل Bow tie که ایده‌ای است ساده از ترکیب علل و پیامدها، ارتباط کلیه پارامترهای موجود در آنالیز عوامل حادثه با اقدامات کنترلی، فعالیت‌ها و وظایف بحرانی را در دو فاز قبل و بعد از وقوع حادثه به طور کامل بررسی خواهد نمود که در نهایت منجر به هدف ایده‌آل هر صنعت که به صفر رساندن حوادث است می‌گردد [۴].

همزمان با رشد روزافزون توجهات بر روی جنبه‌های مختلف ایمنی و ضرورت شناسایی خطرات قبل از بالفعل شدن آن‌ها، ابزارهای متنوعی نیز طراحی و معرفی می‌گردد که هر کدام از نقاط قوت و ضعف خاص خود برخوردار هستند. امروزه این نوع ابزارها که در قالب تکنیک‌های ایمنی سیستمی مطرح می‌شوند، از چنان تنوع و گستردگی برخوردار شده‌اند که جدا از استفاده صحیح و تفسیر درست و دقیق نتایج حاصله، انتخاب درست تکنیک به موضوعی حیاتی تبدیل گردیده است، زیرا انتخاب نامناسب ابزار نه تنها ممکن است از جنبه هزینه اثر بخشی مفید واقع نشود بلکه بدلیل فراهم آوردن نتایج گمراه کننده بسیار خطرناک نیز باشد. بنابراین آگاهی از مشخصات و توانمندی‌های ابزارهای در دسترس و توانایی امکان مقایسه آن‌ها و در نتیجه انتخاب مناسب‌ترین تکنیک گامی بسیار حیاتی در آنالیز ایمنی سیستم‌های بحرانی امروزی بشمار می‌رود. با وجود پیشرفت‌های زیاد ایجاد شده در علم ایمنی و معرفی علم ایمنی سیستمی که بر شناسایی و کنترل خطرات قبل از تبدیل شدن به حادثه تاکید می‌کند، هنوز و به یقین در آینده نیز امکان به صفر رساندن نرخ حوادث امری غیرممکن خواهد بود. بنابراین همواره تحقیقات حوادث بخش انکار ناپذیری از علم ایمنی محسوب شده و طراحی صحیح و اجرای مناسب آن پایه‌ای برای اقدامات پیش‌گیرنده در مورد حوادث احتمالی در آینده را فراهم خواهد ساخت [۵].

نظر به اهمیت و نقش صنایع فرآیندی از جمله صنعت نفت و گاز در اقتصاد هر کشور و از طرفی بالا بودن خطرات و ریسک های موجود در این صنایع، لزوم شناسایی، کنترل خطرات و آنالیز ریسک را بیش از پیش نموده است. لذا با توجه به آشکار شدن نواقص روش‌های آنالیز ریسک در طول زمان و پیچیدگی این فرآیندها، متخصصان ایمنی در صدد یافتن روش‌های نوینی هستند که آنالیز ریسک را سریعتر و دقیق‌تر انجام داده و نواقص روش‌های قبلی را نداشته باشد. دستیابی به چنین روش جامعی با سرعت و دقت بالا بسیار دشوار است [۶].

## پیشینه تحقیق

ماهیت و عملکرد صنایع فرآیندی مانند نفت و گاز، همزمان که از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، گاهاً بسیار خطرآفرین است. شناسایی خطرات و ارزیابی آن‌ها در زمینه‌های مختلف صنعت به خصوص نفت و گاز انجام گرفته و تجزیه و تحلیل نتایج آن‌ها جهت تعریف و اجرای اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه موثر نیز صورت پذیرفته است. آنچه در خصوص تحلیل نتایج ارزیابی ریسک بسیار با اهمیت است، شناسایی دقیق عملیات یا فرآیند مورد مطالعه و بررسی حوادث رخ داده در آن می‌باشد که این مطالعات منجر به تهیه روشی سیستماتیک و مدلی برای تعمیم به سایر بخش‌های صنعت جهت سطح قابل قبولی از ریسک‌های

فرآیندی گردد. استفاده از یک مدل کلی ارزیابی ریسک برای هر سه بخش شناسایی خطرات، پیامدهای احتمالی و اثر بخشی اقدامات اصلاحی هیچ گاه توصیه نشده است. زیرا مدل‌های بررسی پیامدها الزاماً در خصوص تحلیل حوادث کارایی ندارند بنابراین توصیه می‌شود برای هر سه بخش از مدل‌های مخصوص به آن بخش استفاده گردد [۷].

پژوهش‌های متعددی در خصوص شناسایی خطرات و فعالیت‌های پر ریسک در صنایع صورت گرفته است. همچنین متناسب با نتایج ارزیابی ریسک‌های موجود، اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه‌ای نیز تعریف و اجرا گردیده است. ولی نکته‌ای که تا کنون نیز در صنایع حیاتی کشور به آن به شکل جدی پرداخته نشده است، بررسی و تجزیه و تحلیل حوادث رخ داده و پیامدهای آن‌ها به منظور جلوگیری از رخداد مجدد آنهاست. این مهم زمانی به وقوع می‌پیوندد که بتوان تحلیل درست و جامعی از نتایج ارزیابی ریسک مطابق استانداردهای جهانی ارائه نمود. تا کنون بررسی جامعی از روش‌های ارزیابی ریسک مورد استفاده در عملیات توپکرانی هوشمند خطوط لوله انتقال نفت و گاز صورت نگرفته است و در تمامی مطالعات پیشین انجام شده در این خصوص تنها به بررسی یک روش ارزیابی ریسک مشخص پرداخته شده است. از این رو در مطالعه حاضر، روش‌های ارزیابی ریسک مختلف مورد استفاده در عملیات توپکرانی هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است.

آسمانی در پژوهشی به مدل‌سازی عملیات توپکرانی در خطوط لوله نفت و گاز پرداخت. در این پژوهش، مدلسازی دینامیکی توپکرانی در خطوط لوله‌ای که سیال گاز یا مایه در آن جریان دارد، صورت گرفته است. همه توپک‌ها وقتی موثر واقع می‌شوند که با سرعتی مناسب در طول خط لوله حرکت کنند. دانستن سرعت بهینه توپک و مدت زمان توپکرانی بسیار مهم است. این امر می‌تواند به اپراتور کمک کند تا زمانی را که توپک به گیرنده توپک می‌رسد داشته باشد. برای مدلسازی حرکت توپک در خطوط لوله، سیال جلو و سیال پشت توپک با مدل دینامیکی توپک همزمان حل شده است [۸].

کبیری و همکاران در مقاله‌ای به ارزیابی ریسک عملیات پیگرانی خطوط گازی منطقه ده عملیات انتقال گاز به روش Bow tie پرداختند. عملیات پیگرانی با هدف رسوب‌زدایی از خطوط لوله و ممانعت از انتقال ناخالصی‌ها به سایر تأسیسات صنعت گاز و آسیب رسانی به آن‌ها انجام می‌گیرد. این عملیات شامل دو عملیات مستقل ارسال و دریافت پیگ هوشمند می‌باشد که این پیگ با عبور از داخل لوله باعث پاکسازی میزان ناخالصی ها و رسوبات می شود. همچنین پیگ های مخصوص دیگری به منظور شناسایی میزان خوردگی داخل لوله، تغیرات هندسی خط لوله و ... در این عملیات بسته به نیاز استفاده می‌شود. خطرات بالقوه بسیاری در این عملیات موجود است که در صورت عدم تشخیص و کنترل، منجر به بروز حوادث جبران‌ناپذیری خواهد شد. در این مقاله سعی شده است تا با شناسایی موشکافانه خطرات ممکن در این فرآیند، با انجام یک ارزیابی ریسک موفق در محیط نرم‌افزاری Bow tie از وقوع حوادث ناگوار پیشگیری شود [۲].

میرزایی علی‌آبادی و همکاران، در مطالعه‌ای به پیاده‌سازی روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (SPAR-H) در عملیات پیگرانی خطوط لوله انتقال گاز پرداختند. این مطالعه توصیفی به منظور برآورد احتمال خطای انسانی در عملیات پیگرانی در یک شرکت انتقال گاز در ایران انجام شد. ابتدا تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی وظیفه (HTA) از طریق بررسی‌های میدانی، مشاهده وظایف عملیات پیگرانی و انجام مصاحبه با اپراتورهای شاغل در این عملیات انجام شد. در ادامه برای ارزیابی احتمال خطای انسانی، روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (SPAR-H) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که روش SPAR-H یک ابزار مفید و کاربردی برای متخصصان به منظور محاسبه احتمال بروز خطای انسانی است. بر اساس نتایج این مطالعه برخی از اقدامات پیشگیرانه به منظور کاهش احتمال بروز خطای انسانی پیشنهاد گردید که عبارت بودند از: استفاده از دستورالعمل‌های واضح و مشخص برای انجام عملیات و اتوماسیون‌سازی فرآیندهای ارسال و دریافت توپک پیگرانی [۹].

وفایی در مطالعه‌ای به تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان عملکرد انسان در عملیات پیگرانی منطقه ۴ خطوط انتقال گاز ایران پرداخت. در این پژوهش ابتدا با استفاده از جداول تحلیل کیفی روش PetroHRA و کمی سازی بر اساس جداول FMEA به شناخت عملیات، تحلیل ریسک کیفی، اولویت بندی ریسک‌ها و شناسایی عوامل شکل‌دهی عملکرد در عملیات پیگرانی پرداخته شد. سپس بر اساس پرسشنامه طراحی شده و با استفاده از روش CREAM سبک کنترل، احتمال خطای انسانی و قابلیت اطمینان در عملیات پیگرانی منطقه محاسبه گردید. در نهایت به تحلیل حساسیت جهت بهبود عملکرد و ارائه پیشنهادات پرداخته شد. با توجه به نتایج به دست آمده آتش‌سوزی در داخل رسیور و تولید سولفور آهن و برخورد ماشین آلات با تجهیزات گازدار به عنوان خطرناک‌ترین ریسک‌ها، دو عامل زمان و آموزش در جهت بهبود عملکرد، سه عامل توانمندی جهت کار پیچیده، روش، و رابط انسان و ماشین در جهت کاهش عملکرد عمل می‌کنند. پایش پیگ، ارائه ریسک‌ها و ارائه گزارش نهایی دارای بیشترین خطای انسانی می‌باشند. بیشترین خطای کارکرد شناختی مربوط به کارکرد شناختی اجرا است و سبک کنترل منطقه نشان دهنده‌ی پیروی پرسنل از یک روش خاص با عمومیت کم است، لذا اصلاح روش می‌تواند قابلیت اطمینان و توانمندی جهت کار پیچیده را افزایش دهد. همچنین با ثابت ماندن چهار عامل محیط کار، رابط انسان و ماشین، آموزش و زمان و ارتقای سه عامل توانمندی جهت کار پیچیده از ناکارآمد به خیلی کارآمد،

[۱] Hierarchical Task Analysis

روش از نامناسب به قابل قبول و کار تیمی از خوب به عالی، خطای انسانی به میزان چشم‌گیری کاهش خواهد یافت [۱۰].

ولایت‌زاده و همکاران در پژوهشی به مدلسازی ارزیابی ریسک ایستگاه توپکرانی خطوط انتقال گاز به روش SIL[۱] پرداختند. این پژوهش به صورت مقطعی – کاربردی با هدف شناسایی خطرات و ارزیابی کمی ریسک‌های موجود در عملیات توپکرانی صنعت گاز به کمک یک مدل مشابه انجام شده است. در این پژوهش ابتدا روش‌های شناسایی خطرات و حالات شکست و موفقیت شامل روش هازوپ[۲] تحلیل درخت خطا، تحلیل درخت رویداد و تجزیه و تحلیل لایه‌های حفاظتی[۳]بر روی این مدل پیاده‌سازی شد، سپس به کمک روش سطح یکپارگی ایمنی حالات شکست و موفقیت تعیین سطح شد. در روش هازوپ ۹ پارامتر موثر بر خطرات موجود در عملیات توپکرانی شناسایی شدند. در تجزیه و تحلیل درخت خطا دو گروه اصلی عوامل خارجی و داخلی شناسایی شدند که عوامل خارجی شامل عوامل طبیعی، خطای انسانی و خوردگی بود. تجزیه و تحلیل درخت رویداد نشان داد که بالاترین احتمال وقوع مربوطه به پیامد A (انفجار+ نشت گاز+ حرارت و نور+ بدون تلفات) و پایین‌ترین احتمال وقوع مربوط به پیامد I (نشت گاز+ مسمومیت+ آلودگی) به دست آمد. در رویدادهای شناسایی شده بالاترین و پایین‌ترین نرخ شکست مربوط به خرابی شیر کنترل و خرابی شیر ورودی و خروجی بود و با توجه به محاسبات انجام شده در سطح SIL2 قرار گرفته است [۱۱].

هونگ یو[۴]و همکاران در مقاله‌ای به تجزیه و تحلیل ریسک و اقدامات پیشگیرانه برای عملیات توپکرانی خطوط لوله گاز پرداختند و اظهار داشتند که عملیات توپکرانی در خطوط لوله گاز در فواصل طولانی جهت حصول اطمینان از ایمن بودن عملیات باید به صورت منظم و بر اساس برنامه صورت گیرد. بدلیل قابلیت اشتعال و انفجار گاز طبیعی و عملیات بر روی خطوط لوله گاز تحت فشار بالا، عملیات توپکرانی بسیار خطرناک می‌باشد. در این مقاله، خطرات محتمل در عملیات توپکرانی خطوط لوله مانند گیر کردن پیگ، انتشار گاز، نشتی شیرها، خود احتراقی در گاز سولفید هیدروژن (H2S) انفجار گاز طبیعی و آلودگی‌های زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفته و متناسب با آن‌ها اقدامات پیشگیرانه ارائه شده است. عملیات توپکرانی همچنین نیاز به همکاری مستمر و هماهنگ بین گروه‌های حاضر در این عملیات بویژه در زمان پرتاب یا دریافت پیگ دارد [۱۲].

ناگاراج[۵]در مطالعه‌ای توپکرانی هوشمند در خط لوله گاز فشار بالا (مشکلات عملی و راه‌حل‌ها) را مورد بررسی قرار داد و اظهار داشت که پیگ‌های هوشمند یا ابزارهای بازرسی درون خطی (ILI[۶])، دستگاه‌های الکترونیکی هستند که برای جریان در داخل خط لوله انتقال گاز، معمولاً در زمانی که خط در حال سرویس است، برای بازرسی خط لوله برای انواع مختلف مشکلاتی که خطر شکست خط لوله را افزایش می‌دهند، طراحی شده‌اند. این مقاله مشکلات مختلفی را که توپکرانی در خطوط لوله گاز حتی پس از دریافت داده‌ها توسط پرسشنامه خط لوله معمولی مطابق با NACE RP0102 با آن مواجه است، توصیف می‌کند. مشکلات و راه‌حل‌ها از ارسال توپک آغاز شده و هنگام عبور از قسمت‌های مختلف خط لوله و دریافت در دریافت کننده توپک از جمله بازیابی اطلاعات از توپک هوشمند نیز قابل بررسی خواهد بود [۱۳].

لی[۷] و همکاران در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل ریسک در خطوط لوله گاز ترش طبیعی هنگام توپکرانی پرداختند. آنان اظهار داشتند که عملیات توپکرانی یک عملیات با ریسک بسیار بالا است. توپک‌های خط لوله ممکن است گیر کند و منجر به حادثه نشت گاز و حتی آتش‌سوزی و خطر انفجار شود. علاوه بر خطرات احتمالی در توپکرانی خط لوله گاز طبیعی، ممکن است خطرات دیگری نیز در عملیات توپکرانی گاز ترش واقع شود که ریسک عملیات توپکرانی را افزایش می‌دهد. در این مطالعه، در راستای جریان اجرای خاص عملیات توپکرانی، خطرات در فرآیند راه‌اندازی، راندن و دریافت توپک به تفصیل تجزیه و تحلیل شد تا ایمنی کارگران تضمین شود و اطمینان حاصل شود که عملیات توپکرانی به آرامی انجام و تکمیل می‌شود. مطابق با تحقیق لی و همکاران، اگر H2S در گاز طبیعی وجود داشته باشد، میعانات و هیدرات بیشتر ایجاد می‌شوند. گاز اسیدی می‌تواند خوردگی خط لوله را تسریع و چرخه توپکرانی را کوتاه‌تر کند. گاز ترش می‌تواند منجر به مسمومیت کارکنان، آتش‌سوزی یا انفجار شود. احتمال شکست توپک در فرآیند توپکرانی زیاد است. همه موارد فوق نشان می‌دهد که در هنگام حمل و نقل گاز ترش، خطر افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین پیشنهاد کردند که مقداری ماده ضد H2S را برای ساخت توپک انتخاب شود و ماده مقاوم به خوردگی گاز به گاز اضافه شود. علاوه بر آن یک لایه محافظ روی لوله اعمال شود و کارگران هنگام دریافت توپک از ماسک‌های مقاوم در برابر گاز و تجهیزات حفاظت فردی استفاده کنند [۱۴].

## روش ارزیابی ریسک پاپیونی (Bow Tie)

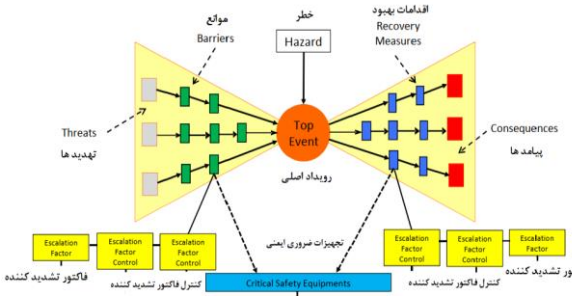
روش پاپیونی یکی از روش‌های مفید در حوزه مدیریت ریسک می‌باشد که ایده اولیه آن در دانشگاه کوئینزلند استرالیا و توسط هازن[۸] در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است و پس از آن این روش در دنیا به طور گسترده پیشرفت نموده است. سوابق و تجارب مطروحه، نشان می‌دهد

[۱] safety integrity level
[۲] hazard and operability study
[۳] LOPA
[۴] Hongyu
[۵] Nagaraj
[۶] inline inspection
[۷] Li
[۸] Hazan

که از این روش می‌توان در مدیریت تمامی ریسک‌ها و خطرات استفاده کرد [۱۵]. این مدل توانسته است از یک سو موازنه مورد نیاز از طریق ارتباط بین سیستم‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری و همچنین ارتباط میان خطرات و پیامدهای ناشی از بروز آن‌ها را به واسطه موانع مورد نیاز و وسایل جبرانی به منظور جلوگیری از بروز حوادث و پیامدهای زنجیرهای ناشی از آن‌ها را برقرار و نحوه کنترل آن‌ها را در سیستم مدیریت ایمنی، بهداشت و محیط زیست به خوبی نشان دهد. در این میان آگاهی افراد در سطوح مختلف از نقش موثر آن‌ها در کنترل خطرات و پیامدهای ناشی آن‌ها بیشترین تاثیر را در بهبود ساختار و عملکرد سیستم‌های مدیریت ایمنی، بهداشت و محیطزیست دارد [۱۶].

این روش قابلیت نمایش ارتباط تمامی مؤلفه‌های موجود در تحلیل عوامل بالقوهٔ آسیب‌رسان با اقدامات کنترلی، فعالیت‌ها و وظایف بحرانی را دارد و روشن‌ترین تصویرسازی گرافیکی از مدیریت ریسک است و می توان راهکارهای مدیریتی را در قالب مدل پاپیونی جهت کاهش و کنترل ریسک‌های شناسایی شده ارائه نمود [۱۷].

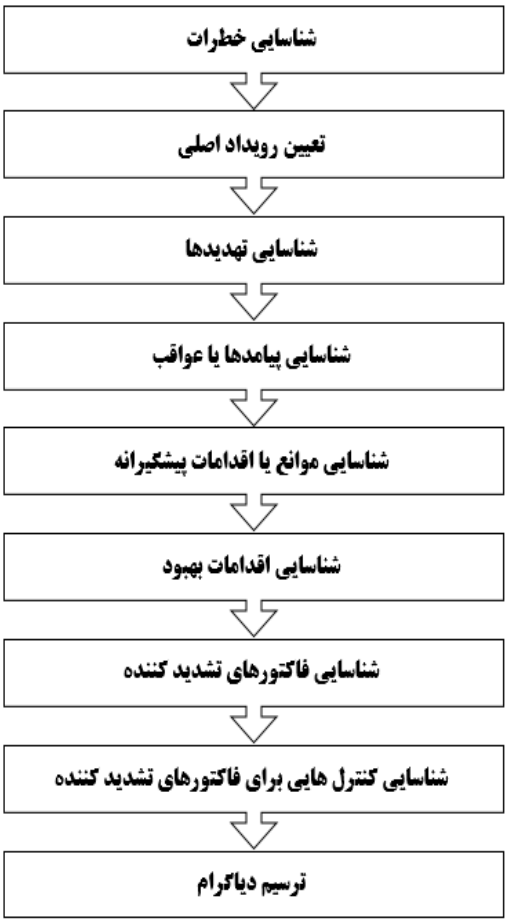
روش ارزیابی ریسک Bow-tie یک روش احتمالاتی یکپارچه در مدیریت ریسک است که با یافتن علل بنیادین بروز یک حادثه و روابط منطقی آن‌ها، به تجزیه و تحلیل پیامدهای آن و ارزیابی احتمالات و مسیر رخداد سناریوهای مختلف جهت جلوگیری، کنترل و کاهش رویدادهای ناخواسته می‌پردازد. نمایش گرافیکی این روش با ترکیب درخت خطا (FTA) و درخت رویداد (ETA) شکل می‌گیرد [۱۸].




**شکل ۱:** نمودار پاپیونی مدل Bow Tie [۱۹]

نمودار Bow-tie شامل پنج عنصر اصلی است: رویدادهای پایه‌ای BE، درخت خطا FT، رویداد شروع کننده اصلی، درخت رویداد ET و رویداد خارجی. درخت خطا در سمت چپ نمودار و درخت رویداد در سمت راست نمودار قرار دارد؛ در نهایت با ترکیب درخت خطا و رویداد، تمام علل و عواقب مربوط به یک رویداد مهم شناسایی شده و دیاگرام Bow-tie تشکیل می‌شود (شکل ۱) [۱۹].

تجزیه و تحلیل درخت خطا، روشی گرافیکی است که روابط بین یک رویداد اصلی با رویدادهای پایه را در یک شکل نشان می‌دهد. این روش براساس شناسایی یک رویداد نامطلوب خاص (رویداد اصلی) استوار است و در واقع ترکیب علت‌هایی که می‌توانند منجر به این رویداد شوند را مورد ارزیابی قرار می‌دهد [۲۰]. روش تحلیل درخت رویداد یا پیامد، عبارت از یک تکنیک مدل‌سازی قیاسی است که با ایجاد دو شاخه موفقیت و شکست به طور هم‌زمان به ارزیابی پیامدهای یک رویداد منفرد می‌پردازد. این تکنیک پاسخ‌های سیستم در برابر یک رویداد آغازگر را تشریح کرده و امکان ارزیابی احتمال یک پیامد مطلوب و یا نامطلوب را فراهم می‌کند [۱۸]. شکل ۲، مراحل اجرای روش Bow tie را نمایش می دهد.




**شکل ۲:** مراحل اجرای روشBow Tie [۱۹]

## مزایا و معایب روش ارزیابی ریسک Bow Tie

تکنیک پاپیونی یکی از تکنیک‌های مفید برای مدیریت ریسک است که طی آن، ارتباط میان همه عوامل مرتبط با فرآیند خطر نشان داده می‌شود؛ همچنین ارتباط همه مؤلفه‌ها در تحلیل عوامل بالقوه آسیب‌رسان با اقدامات کنترلی، فعالیت‌ها و وظایف بحرانی به طور کامل بررسی می‌گردند. روش پاپیونی می‌تواند عملکرد حفاظ یا مانع (مثل زمان پاسخ، کارایی و سطح اطمینان) را ارزیابی و حفاظهای معیوب یا فقدان آن‌ها را شناسایی کند. این روش می‌تواند به طور ویژه برای نشان دادن اثر سیستم‌های ایمنی و موانع بر روی پیشرفت سناریوهای حادثه سودمند و مفید باشد [۱۹].

دیاگرام Bow-tie ریسک مورد بررسی را به صورتی ساده و قابل درک به تصویر می‌کشد. قدرت این روش در نمایش سناریوهای محتمل در ارزیابی یک ریسک و ارتباط منطقی بین علل و پیامدهای آن در یک نمودار می‌باشد سناریوهایی که به هر روش دیگری بسیار پیچیده‌تر به تصویر کشیده می‌شدند. به کمک این روش می‌توان مهم‌ترین سناریوها را تعیین نمود و به کنترل ریسک و کاهش رویدادهای ناخواسته پرداخت [۱۸].

تکنیک پاپیونی به عنوان یک رویکرد، هر دو عنصر پیشگیرانه و واکنشی را در نظر می‌گیرد و در عمل به عنوان روش سودمندی برای پیشگیری، کنترل و کاهش وقوع حوادث به کار می‌رود. این روش یک ابزار تجسمی نیرومند برای نمایش فعل و انفعالات تنظیمی در بروز رویدادها و حوادث در یک سازمان است و علاوه بر اینکه رویدادهای پراهمیت را نشان می‌دهد، قادر است تا رویدادهای قابل اغماض را هم نمایان کند؛ بنابراین، در صورت استفاده از این روش به صورت ترکیبی با سایر روش‌های ارزیابی ریسک می‌توان ریسک فاکتورهای خطرناک و در نتیجه، رویداد اصلی را شناسایی کرد و به عبارتی می‌توان همه توجه و تلاش خود را بر روی شناسایی و کنترل عوامل موثر بر روی رویداد اصلی متمرکز کرد و از اتلاف انرژی و زمان به دلیل بررسی رویدادهای غیر اصلی جلوگیری نمود [۱۹].

مارکوفسکی[1] در پژوهشی اظهار داشت که در میان مدل‌های کیفی مختلف مورد استفاده برای ارائه سناریو حادثه، رویکرد Bow-tie بهترین ارائه تصویری از ارتباط میان خطرات مختلف (علل)، حادثه، سیستم‌های ایمنی و پیامدها محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که این روش به علت انعطاف‌پذیری بالا در قیاس با سایر روش‌های ارزیابی ریسک از مزیت نسبی برخوردار است [۲۱]. مهم‌ترین مزیت رویکرد پذیرش Bow-tie در تجزیه‌وتحلیل ریسک عبارت است از اینکه یک تکنیک محکم برای شناسایی جامع کلیه رویدادهای خطر فراهم می‌کند و درک روابط متقابل آن‌ها را ترویج می‌کند. برای برقراری ارتباط بین علت و اثر اساسی سناریوهای پیچیده‌تر ریسک، از یک قالب به شکل یک طرح آسان برای درک استفاده می‌کند [۵].

با استفاده از مدل پاپیونی می‌توان به اهداف مدیریت ریسک از جمله اعمال مدیریت به صورت پیش از وقوع به جای مدیریت پس از وقوع، تعیین کفایت کنترل‌های موجود یا طرح‌ریزی شده برای پیشگیری از بروز حادثه، تعیین کفایت کنترل‌های موجود یا طرح‌ریزی شده برای پیشگیری از بروز حادثه، تعیین کفایت کنترل‌های موجود یا طرح‌ریزی شده برای حوادث پس از وقوع حادثه و سهولت تصمیم‌گیری در مورد لزوم و عملی بودن رویه‌های اجرایی و ارتباط آن ها با ریسک‌های موجود دست یافت. مشخص کردن تمایز میان موانع پیشگیرانه و واکنشی برای حذف یا کاهش آثار بروز ریسک یک حادثه خاص و قابلیت‌های روش پاپیونی در ساده‌سازی تعیین و تشخیص عوامل علت و معلولی، همچنین خلاصه‌سازی و تبدیل مقدار زیادی از داده‌های کمی به تعداد نسبتاً کمی از سناریوهای رایج از ویژگی‌های مفید روش پاپیونی است. در نتیجه می‌توان رویکرد پاپیونی را شیوه‌ای موثر برای ارائه و ابلاغ ریسک پروژه و مدیریت آن دانست که برای تمامی سطوح مسئولان و کارکنان پروژه قابل درک است [۱۷].

استفاده از روش سیستماتیک و تحلیلی Bow-tie ضمن تعیین علل ریشه‌ای حوادث در تعیین وظایف بحرانی با هدف اطمینان از یکپارچگی و اثربخشی کنترل‌های جاری کاملاً موثر بوده و نقش مهمی در شناسایی شاخص‌های کلیدی عملکرد HSE و بهبود آن‌ها ارائه می‌دهد [۵]. با وجود تمامی مزایایی که پیش‌تر بیان شد، روش Bow-tie روشی کامل برای کمی کردن میزان ریسک، به‌روز رسانی داده‌های قدیمی و مدل‌سازی روابط پیچیده بین موانع ایمنی و بروز حادثه نبوده و قادر به بروز رسانی احتمالات گذشته بر اساس اطلاعات و داده‌های جدید نمی‌باشد. همچنین به منظور لحاظ کردن نقص‌هایی با علت‌های مشترک و در نظرگرفتن ارتباط بین علت‌ها باید از تلفیق این روش با سایر روش‌های ارزیابی ریسک استفاده نمود [۲۰].

## نتایج

با توجه به ماهیت عملیات توپکرانی هوشمند در صنایع نفت و گاز، این عملیات جزء عملیات‌های با ریسک بالا و پر خطر محسوب می‌گردد و انجام ارزیابی ریسک به منظور اجرای اقدامات پیشگیرانه در جهت پیشگیری از بروز حوادث جبران‌ناپذیر و همچنین اقدامات کنترلی جهت کاهش پیامدهای حوادث احتمالی در این عملیات بسیار حائز اهمیت است.

تمامی روش‌های آنالیز ریسک دارای نقاط ضعف و قوتی هستند که به نظر می‌رسد ترکیب این روش‌ها و اجرای آن‌ها در سطوح مختلف یک مطالعه آنالیز ریسک بسیار منطقی‌تر باشد. این موضوع را می‌توان با نگاهی نو به مدل پنیر سوئیسی تشریح و تبیین نمود. به این صورت که اگر روش‌های آنالیز ریسک را همان لایه‌های حفاظتی در نظر بگیریم و خطرات را عدم شناسایی ریسک‌ها و نقاط ضعف روش‌ها را مسیر تبدیل ریسک‌های شناسایی نشده به حادثه فرض کنیم، بهترین راه کنترل ریسک‌ها، به خصوص ریسک‌های صنایع فرآیندی، ترکیب روش‌های آنالیز ریسک است. به عبارتی تجمیع نقاط قوت و همپوشانی نقاط ضعف روش‌های آنالیز ریسک، مسیرهای تبدیل خطرات (عدم شناسایی ریسک‌ها) به حوادث را محدود خواهد نمود [۶].

نمودار پاپیونی ابزاری جذاب برای شناسایی ریسک و تجزیه و تحلیل کیفی است که نه تنها مسیرهای احتمالی میان مخاطرات و

[1] Markowski

حوادث را به تصـویر می‌کشـد، بلکه تمایز میان موانع پیشـگیرانه و کاهنده اثر را به وضـوح آشـکار می‌کند. مزیت دیگر آن کمک به اولویت بخشی اقدامات ایمنی است که ارزش بسیاری برای حمایت از تصمیم‌گیری دارد. تمام علل و پیامدهای یک حادثه به وضوح در نمودار پاپیونی به تصـویر کشـیده می‌شـود. علاوه بر این به نظر می‌رسد برای نشان دادن تاثیر سیستم‌های ایمنی و موانع در توالی سـناریوهای حادثه بسـیار مفید اسـت. با این روش می‌توان یک ارزیابی از عملکرد موانع (برای مثال زمان پاسـخ، کارایی و سـطح اطمینان) به د ست آورد. از ویژگی‌های مهم و مفید آنالیز موانع این ا ست که به شنا سایی موانع از د ست رفته یا بد طراحی شده کمک می‌کند که مسئله کلیدی در مدیریت است [۲۲].

برر سی نتایج مطالعات انجام شده پیشین در خصوص ارزیابی ری سک عملیات توپکرانی هو شمند ن شان می‌دهد که روش Bow-tie نسـبت به سـایر روش‌های ارزیابی ریسـک، روش جامع‌تر و دقیق‌تری بوده که علاوه بر بررسـی علل وقوع رویدادها و اقدامات کنترلی و پیشـگیرانه آن ها، قادر به بررسـی پیامدهای رویداد و عوامل کنترل‌کننده آن ها جهت کاهش شـدت پیامدهای رویداد می با شد که با توجه به فرآیندی بودن عملیات توپکرانی هو شمند و ریسـک های این عملیات به لحاظ فعالیت ها، تجهیزات، افراد، محیط زیسـت و ...، انجام ارزیابی ریسـک جامع از این عملیات را میسر می‌سازد.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در حال حا ضر بیش از ۷۰ روش کمی و کیفی ارزیابی ری سک در دنیا وجود دارد که از نتایج آن ها می‌توان جهت مدیر یت و تصـمیم‌گیری در خصـوص کنترل ریسـک و کاهش پیامدهای آن بهره برد. روش‌هایی که در تحقیقات پیشـین در خصـوص ارزیابی ری سک عملیات توپکرانی هو شمند مورد ا ستفاده قرار گرفته ا ست عبارتند از: HAZOP، Bowtie، SPAR-H، FMEA، CREAM و SIL. نتایج مطالعات پیشـین نشـان می‌دهد که به منظور ارزیابی جامع خطرات در عملیات‌های فرآیندی نظیر توپکرانی هوشـمند، ترکیبی از روش‌های اسـتنتاجی و قیاسـی باید مورد اسـتفاده قرار گیرد که روش Bowtie با تو جه به ترکیب این روش ها، گزینه مناسبی برای این منظور می‌باشد.

مهم‌ترین مواردی که در انتخاب روش ارزیابی ری سک منا سب باید به آن توجه گردد عبارتند از نوع نتایج مورد نیاز، سـطح دقت، مقیاس زمانی و بودجه مالی. به گونه‌ای که نوع نتایج مورد نیاز برای تصمیم‌گیری مدیران وابسته به سطح دقت مطالعه و این نیز خود متاثر از زمان و منابع مالی در دسترس می‌باشد.

با توجه به تحقیقات انجام شـده در داخل و خارج از کشـور در خصـوص ارزیابی ریسـک عملیات توپکرانی هوشـمند و همچنین خطرات موجود در این عملیات، انجام یک مطالعه و کار پژوهشـی کامل و اسـتفاده از یک روش ارزیابی ریسـک جامع جهت عملیات توپکرانی هوشـمند یک ضـرورت تلقی می‌گردد که می‌تواند موجب ارتقای سـطح ایمنی در انجام عملیات توپکرانی هوشـمند و پیشگیری از بروز حوادث جبران‌ناپذیر جانی و مالی گردد.

## مراجع


[۱]ا. نبی‌پور، م. ملایری، "پیگ و پیگ‌رانی در خطوط لوله: چالش‌ها و پیشرفت‌ها"، ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۹۰، ص: ۸۳-۷۱، ۱۳۹۹.

[۲]ص. کبیری، ح. خسروی، ح. رشیدی، ح. شیری، "ارزیابی ریسک عملیات پیگرانی خطوط گازی منطقه ده عملیات انتقال گاز به روش Bow tie "، سومین همایش ملی مهندسی فرآیند (نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی)، تهران، ۱۳۹۳.

[۳]ف. حمزوی، د. مولا، ح. مومنی، "تکنولوژی‌های جدید پیگ هوشمند در بازرسی خطوط لوله انتقال"، سومین همایش ملی گاز ایران، تهران، ۱۳۸۸.

[۴]ا. تکیه، م. جعفری، ب. مرتضوی، "کاربرد تکنیک Bow-Tie در آنالیز حادثه واحد SRP پالایشگاه شهید تندگویان تهران"، هفتمین همایش سراسری بهداشت و ایمنی کار، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران، ۱۳۹۰.

[۵]م. ولایت‌زاده، س. دوازده امامی، م. ولایت‌زاده، "مدلسازی تجزیه و تحلیل علل برخی حوادث موجود در پروژه‌های صنعتی به روش پاپیونی یا Bow-Tie "، چهارمین کنفرانس ملی ایمنی و بهداشت، مرکز توسعه و گسترش مطالعات میان رشته ای، تهران، ۱۴۰۰.

[۶]م. صحافی، م. نصرآبادی، س. گیوه چی، "ضرورت و اهمیت بکارگیری روش‌های آنالیز ریسک چند سطحی یا ترکیبی جهت تعیین میزان یکپارچگی ایمنی SIL در صنایع فرآیندی – صنایع نفت و گاز"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران و HSE در شریان‌های حیاتی، صنایع و مدیریت شهری، تهران، ۱۳۹۳.

[۷]ع. سعدونی، "ارزیابی ریسک ایستگاه تقلیل فشار گاز به روش Bow tie و تحلیل داده‌ها جهت تعیین سطح میزان یکپارچگی ایمنی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی گچساران، ۱۳۹۷.

[۸]م. آسمانی، "مدل‌سازی عملیات توپک‌رانی در خطوط لوله نفت و گاز"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی*، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، ۱۳۸۵.

[۹]م. میرزایی علی‌آبادی، ر. اسمعیلی، ا. محمدفام، م. اشرفی، "پیاده‌سازی روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (SPAR-H) در عملیات پیگرانی خطوط لوله انتقال گاز"، *مجله مهندسی بهداشت حرفه ای*، دوره ۶، شماره ۳، ص: ۴۳-۳۴، ۱۳۹۸.

[۱۰]م. وفایی، "تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان عملکرد انسان در عملیات پیگرانی منطقه ۴ خطوط انتقال گاز ایران". *پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع*، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۹.

[۱۱]م. ولایت‌زاده، س. دوازده امامی، ح. احمدی، و. امیدوار، "مدلسازی ارزیابی ریسک ایستگاه توپکرانی (Pigging) خطوط انتقال گاز به روش (SIL)"، *اولین همایش ملی مخاطرات، مدیریت ریسک و سلامت با تمرکز بر صنایع نفت، گاز و پتروشیمی*، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، ۱۴۰۰.

[12] P. Hongyu, L. Shiao, J. Hong, "Risk analysis and countermeasures for pigging operation of gas pipelines," *Oil & Gas Storage and Transportation Journal*, pp. 461-462, 2012.

[13] J. Nagaraj, "Smart pigging in high pressure gas pipeline practical problems and solution-A case study," *India Oil and Gas Pipeline Conference (IOGPC2013)*, India, Jaipur, 2013.

[14] N. Li, L. Chen, Y. Li, X. He, L. Song, J. Sun, "Risk Analysis of Sour Natural Gas Pipeline when Pigging," *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology (IJEART)*, Vol.1, Issue.3, pp. 4-6, 2015.

[۱۵]م. میرزایی علی‌آبادی، ا. کلات پور، ا. محمد فام، ی. بابایی مسدرقی، "ارزیابی ریسک مخازن ذخیره‌سازی گاز نفتی مایع شونده در صنایع فرآیندی با استفاده از روش پاپیونی"، *مجله مهندسی بهداشت حرفه ای*، دوره ۳، شماره ۲، ص: ۱۰-۱، ۱۳۹۵.

[۱۶]م. صامتی، "نقش مدل پاپیونی Bow-tie Method در بهبود و بهینه‌سازی فرآیند مدیریت ریسک"، *هفتمین همایش سراسری بهداشت حرفه ای*، قزوین، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، ۱۳۹۰.

[۱۷]ن. قارون، ع. جوزی، "مدیریت ریسک محیطزیستی خط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی بندرعباس – سیرجان به روش پاپیونی (Bow-tie)" ، *مجله محیط شناسی*، سال سی و نهم، شماره ۳، ص: ۱۳۳-۱۵۰، ۱۳۹۲.

[۱۸]پ. حیرانی، ع. بقایی، "ارزیابی ریسک خطوط لوله انتقال نفت و گاز بر مبنای روش Bow-tie فازی شده"، *فصلنامه بهداشت و ایمنی کار*، جلد ۶، شماره ۱، ص: ۷۰-۵۹، ۱۳۹۵.

[۱۹]م. کاظمی، ع. عباسی، م. کاظمی، ن. جمشیدزاده، م. رشیدی، "شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک بخش‌های مختلف پالایشگاه گاز ایلام با استفاده از رویکرد تلفیقی روش‌های Bow-tie و FMEA "، *مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی ایلام*، دوره بیست و نهم، شماره دوم، ۱۴۰۰.

[۲۰]م. میرزایی علی‌آبادی، ا. محمدفام، ا. احمدی‌گهر، ر. اسمعیلی، "آنالیز ریسک فوران (Blowout) چاه‌های اکتشافی نفت و گاز در فاز عملیات حفاری با استفاده از تکنیک تحلیل پاپیونی (BTA) و شبکه بیزین"، *مجله مهندسی بهداشت حرفه ای*، دوره ۴، شماره ۴، ص: ۶۹-۵۹، ۱۳۹۶.

[21] A.S. Markowski, A. Kotynia, "Bow-tie model in Layer of Protection Analysis", *Process Safety and Environment Protection*, Vol.89, Issue.4, pp. 205-213, 2011.

[22] C. Jacinto, C. Silva, "A semi-quantitative assessment of occupational risks using bow-tie representation," *Safety Science*, No.48, pp. 973–979, 2010.